

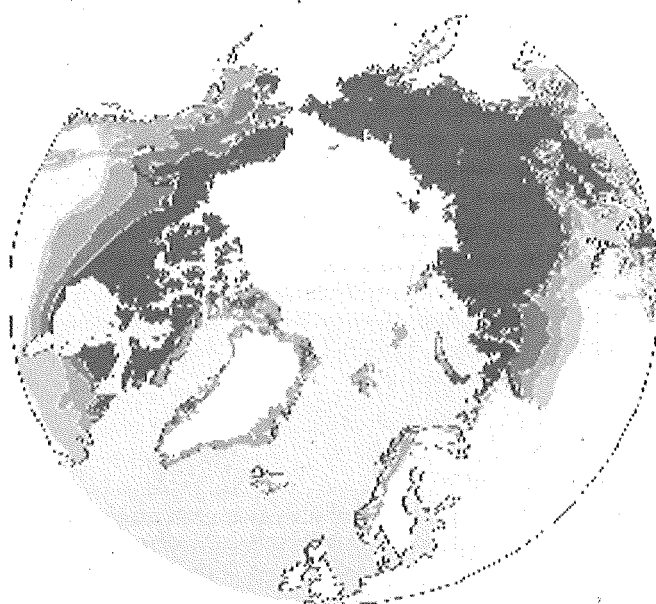
1.6 Rolle des Permafrosts bei der Landschaftsbildung in der Arktis und Subarktis

HANS-WOLFGANG HUBBERTEN & LUTZ SCHIRRMESTER

Function of permafrost in shaping the landscape in the Arctic and Sub-arctic region: As a result of the negative energy balance of the Earth / atmosphere system in the polar region almost 25% of the land areas of the earth are underlain by permafrost. Permafrost is of marginal importance not only in the Antarctic but dominates the landscape and ecosystems of the large tundra and boreal forest areas of Eurasia and North America where it can reach a thickness of more than 1000 m. Formed since the Late Pliocene it has its largest extension in the areas which have not been glaciated during the last glacial cycles where permafrost never disappeared completely during the last interglacials. Due to the low sea level in glacial periods terrestrial permafrost has been formed on the large Arctic shelf where it still exists as relict of up to 400 m thickness. The observed warming of the Arctic results in an increased thickness of the active layer, a rise in permafrost temperature observed even in deeper boreholes, and in the disappearance of discontinuous permafrost at the southern boundary. The reaction of permafrost to warming will result in complex changes of the ecosystems as well as most probably in an increase of methane emission to the atmosphere. It will also result in a destabilization of regions, which are used by men for settlements and economic infrastructure.

Per Definition wird jeder Boden bzw. jedes Gestein, das über zwei aufeinander folgende Jahre negative Temperaturen aufweist als Dauerfrost oder Permafrost bezeichnet (VAN EVERDINGEN 2002). Nach dieser Definition sind ungefähr ein Viertel des Festlandes weltweit von Permafrost unterlagert (ZHANG et al. 1999). Nach seiner Verbreitung unterscheidet man kontinuierlichen von diskontinuierlichem Permafrost und zusätzlich noch submarinen Permafrost, der vor allem unter den flachen Schelfmeeren der Arktis liegt (Abb. 1.6-1). Permafrost ist im Wesentlichen ein Klimaphänomen. Es resultiert daraus, dass bei langfristig einwirkenden extrem niedrigen Wintertemperaturen der Boden so stark und tief gefroren ist, dass

während des Sommers die gesamte gefrorene Zone nicht wieder auftauen kann. Es bildet sich nur eine oberflächen-nahe Auftauzone, die sogenannte aktive Schicht, aus, die je nach Ausprägung des sommerlichen Wärmehaushalts und der Standortbedingungen zwischen 0,3–0,5 m bis zu mehreren Metern mächtig sein kann. Daran schließt sich eine Übergangszone an, in der die Bodentemperaturen im negativen Bereich schwanken können. Noch tiefer in der Permafrostzone lässt die Wärmewirkung von der Oberfläche her völlig nach. Die charakteristischen Permafrosttemperaturen für einen geographischen Punkt werden in einer Tiefe erfasst, in der keine Temperaturschwankungen mehr auftreten. Erst in größeren Tiefen, in denen der



Permafrost
 Continuous
 Discontinuous
 Sporadic
 Isolated

Abb. 1.6-1: Permafrostverbreitung auf der Nordhemisphäre (Karte: UNEP/ GRIP-Arendal IPA 1998).

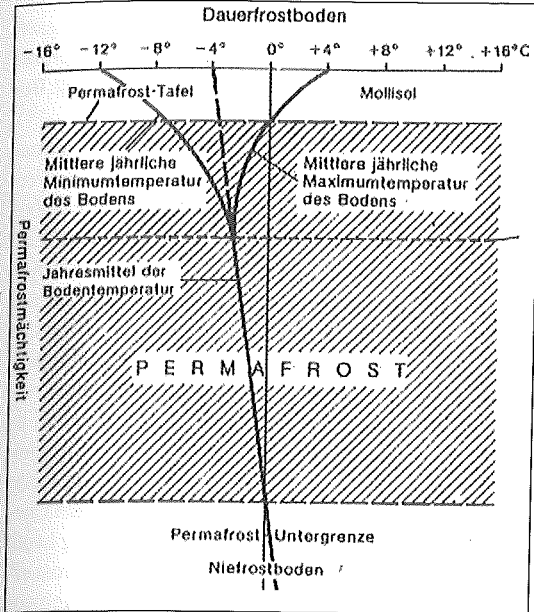


Abb. 1.6-2: Schematischer Aufbau und Temperaturverlauf in der Permafrostzone (aus WEISE 1983).

Eines der hervorstechenden Merkmale für die Existenz von Permafrost ist das Auftreten von Eiskeilen und Eiskeilpolygonnetzen. Sie entstehen infolge der Schrumpfung des gefrorenen Bodens bei starkem Frost. Eis zieht sich bei Abkühlung zusammen (um 0,05 mm/m Eissäule) und bei einer Abkühlung um 20° C bildet sich eine Frostspalte von 1 mm. Die Kontraktionsrisse fügen sich, ähnlich wie Trockenrisse zu netzartigen Mustern zusammen. Werden die Frostspalten im Frühjahr mit Schmelzwasser gefüllt, so gefriert dieses Wasser im Permafrostboden sofort wieder und füllt die Frostspalte aus. Durch ständige Wiederholung des Gefrier/Tau-Prozesses bilden sich große, keilförmige Eiskörper (Eiskeile) (Abb. 1.6-3).

Geschichte des Permafrostes in Sibirien, erste PF-Spuren

Als es zum Ende des Tertiär vor ca. 5 Mio. Jahren zu einer weltweiten Abkühlung kam, veränderte sich z.B. im Norden Sibiriens die Vegetation von einer gemäßigten Waldflora in eine Wald-, Steppen- bzw. Tundrenflora. Dies ist durch zahlreiche Pollenanalysen aus gefrorenen Ablagerungen nachgewiesen. Seit ca. 3 Mio. Jahren am Ende des Pliozän trat Permafrost in Sibirien auf. Anzeichen von altem Permafrost sind ausgetaute und verfüllte Eiskeile, sogenannte Eiskeilpseudomorphosen in Ablagerungen des oberen Pliozän. Seit Beginn des Eiszeitalters auf der nördlichen Erdhalbkugel vor ca. 1,5 Mio. Jahren existierte in großen Teilen Sibiriens zumindest zeitweise Dauerfrost. Kontinuierliche Permafrostbedingungen sind seit ca. 600.000 Jahren nachgewiesen. Vor allem in den Kaltzeiten verstärkte sich die Bildung von Permafrost und seine Ausbreitung weiter nach Süden. Dagegen kam es in Warmzeiten zu einer Verschiebung der südlichen Permafrostgrenze nach Norden und zu großflächiger Degradierung der geschlossenen Permafrostdecke durch Auftauen von der Oberfläche her. Das Eis im Permafrostboden schmolz, der Boden senkte sich ab und es entstanden Senken, in denen sich Regen und Schmelzwasser sammelte. Im Ergebnis dieses Auftauens bildeten sich zuerst kleine Gewässer. Da der Boden in der Tiefe noch gefroren war konnte das Wasser nicht versickern. Ab einer Wassertiefe von 2 m frieren Süßwasserseen nicht mehr bis zum Boden durch und es bleibt eine Wassersäule mit positiven Temperaturen über dem Seeboden bestehen. Der Prozess des Auftauens verstärkt sich und es kann sich ein größerer See bilden. So entstandene Seegebiete kennzeichnen heute noch die Ebenen in arktischen Tieflandgebieten. Die Degradierung von eisgesättigtem Gestein von der Oberfläche her wird als Thermokarst bezeichnet.

Wärmefluss aus dem Erdinnern stärker zum Tragen kommt, hebt dieser die Frosteinwirkung allmählich wieder auf (Abb. 1.6-2). In Abhängigkeit von der Art des Gesteins (Wärmeleitfähigkeit) und der darin auftretenden Porenwasser (Salzwasser, das bei Temperaturen unter 0°C noch nicht gefriert, transportiert den Frost weiter in die Tiefe), der Dauer und Intensität der Frosteinwirkung können Permafrostmächtigkeiten von wenigen Metern bis zu 1,5 km auftreten.

Wo ist Dauerfrost verbreitet und warum besonders in Sibirien?

Permafrost ist am weitesten in den hohen Breiten der Nordhalbkugel verbreitet und umrahmt das gesamte Nordpolarmeer. Zusätzlich tritt Permafrost auch in zahlreichen Hochgebirgen, in den wenigen unvergletscherten Gebieten der Antarktis sowie unter so genannten kalten Gletschern auf. Das extrem kontinentale Klima in Sibirien führt dazu, dass kalte trockene Luftmassen aus dem fast ganzjährigen polaren Kältehoch nach Süden strömen. Daraus ergeben sich eine weit nach Süden reichende Permafrostzone (Abb. 1.6-1) und große Permafrostmächtigkeiten. Das Eindringen des Frostes wird durch die große Trockenheit und die nur dünne und damit wenig isolierende Schneedecke unterstützt. Es kommt hinzu, dass große Gebiete im Osten Sibiriens während der Eiszeiten nicht vergletschert waren und deshalb dort die isolierenden Gletscherkappen fehlten. Dadurch konnte der Frost über lange Zeiträume tief eindringen.

Permafrost als Umweltarchiv

Über die Jahrzehntausende bildeten sich bis zu 80 m mächtige eisreiche Ablagerungen, so genannte Eiskomplexe, in denen Eiskeile von bis zu 5 m Breite vorkommen (Abb. 1.6-3). Innerhalb der polygonalen Eiskeilnetze entstehen in dem kurzen arktischen Sommer durch das saisonale Auftauen kleine feuchte oder mit Wasser gefüllte Senken in denen Pflanzen, aquatische Kleinstlebewesen und Mikroben aktiv werden, die dann beim Gefrieren im Winter wieder fixiert und später im Permafrost konserviert werden. Der zusätzliche Eintrag von terrigenem Material durch zeitweilige Überflutung und durch Windtransport führt zu einer kontinuierlich wiederholten Erhöhung der Oberfläche. Durch die Kombination von Klimainformationen einzelner Jahre aus den Eisadern der Eiskeile mit den chronologisch angeordneten Umweltinformationen aus den sie umgebenden Sedimentsequenzen stellen die Eiskomplexe ein ideales Archiv zur Rekonstruktion vergangener polarer Ökosysteme dar. Die Zusammensetzung von Sedimenten kann z.B. darüber informieren, ob Flüsse, Seen oder Sümpfe existiert haben, d.h. in welcher Landschaft sich die Permafrostablagerungen gebildet haben. Die zahlreichen Eiskeile, können uns etwas über die Zusammensetzung der Winterniederschläge vor tausenden oder zehntausenden von Jahren sagen. Pollen und Samen der Pflanzen geben uns Auskunft über die Veränderungen der Vegetation in Abhängigkeit von Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen. Aus Käferresten und Resten von Säugetieren (z.B. Mammut, Wollnashorn, Pferd), aus Kieselalgen (Diatomeen), die zum Teil aus Siliziumoxid bestehen, aus Kalkschalen kleiner

Krebse (Ostrakoden), Muscheln oder Schnecken lassen sich die vergangene Umwelt und ihre Veränderungen rekonstruieren, da viele der Lebewesen sich an spezielle Bedingungen angepasst haben.

Bisherige absolute Altersbestimmungen von Permafrostabfolgen reichen 50.000–200.000 Jahre in die Vergangenheit (SCHIRMEISTER et al. 2002a/b). Andere, bekannte Klima- und Umweltarchive wie Gletschereis (z.B. Grönland, Antarktis), Meeresablagerungen der Ozeane oder Sedimente in tiefen Süßwasserseen (z.B. Baikalsee) stehen in den riesigen Gebieten arktischen Festlandes nicht zur Verfügung. Daher sind dort Permafrostabfolgen, die einzigen weit in die eiszeitliche Vergangenheit reichenden Sequenzen, die zugänglich sind und das weltweite Netz der Umweltarchive um eine wichtige Region ergänzen. In großem Umfang finden sich fossile Reste einer eiszeitlichen Tierwelt, die als Mammutfauna bezeichnet wird und die in dieser Zusammensetzung heute nicht mehr existiert (s. Kap. 3.2). Die im Permafrost erhaltenen Floren- und Faunenreste der Arktis belegen vor allem auch, dass in den großen nordostsibirischen Tieflandgebieten und der sich nördlich anschließenden arktischen Schelfebene keine ausgedehnten Eiskappen wie im Westen Eurasiens und in Nordamerika existiert haben (HUBBERTEN et al. 2004). Es lässt sich erkennen, wie die empfindlichen arktischen Landschaften und die darin lebenden Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen auf Klimaerwärmungen und -abkühlungen der Vergangenheit reagiert haben. So ergibt sich schließlich ein Mosaik an Informationen unterschiedlicher Genauigkeit, zeitlicher und räumlicher Auflösung, das es ermöglicht, zum einen aus

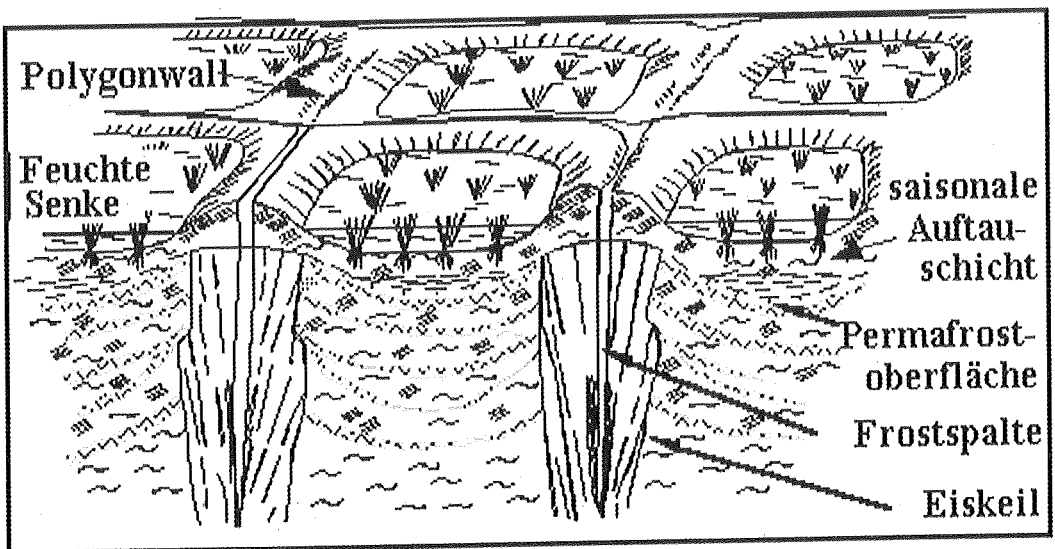


Abb. 1.6-3: Blockschema zur Bildung eisreicher Permafrostablagerungen (Eiskomplex) (nach ROMANOVSKII 1998)

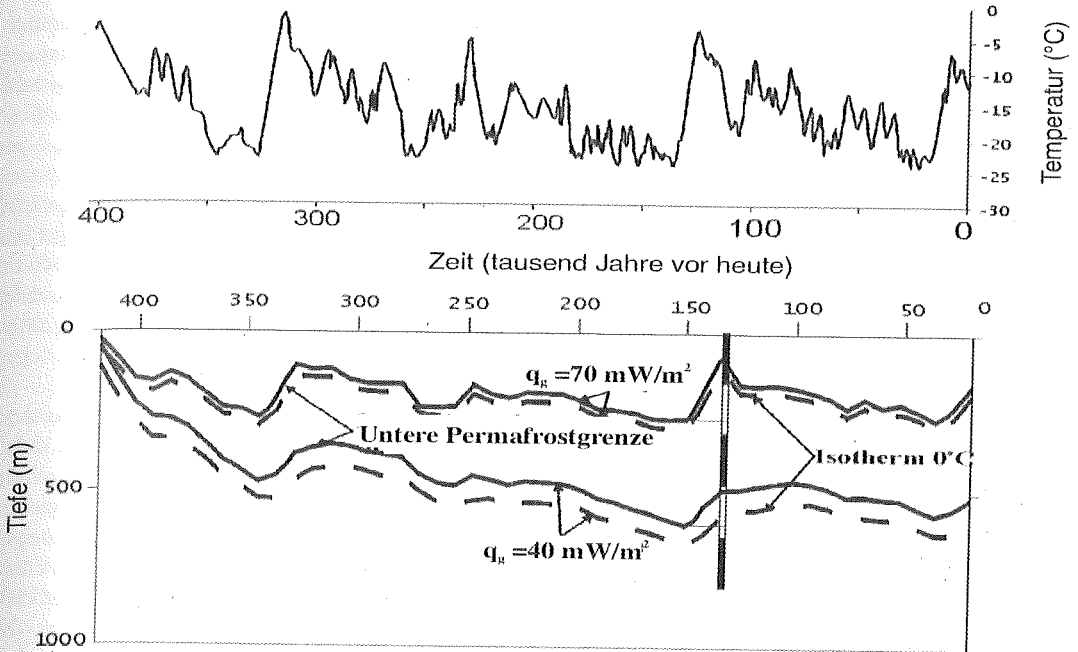


Abb. 1.6-4: Klima gesteuerte Variation der Permafrostmächtigkeit während der letzten 400.000 Jahre (ROMANOVSKII et al. 2004). Oben: Als Vergleich die Änderung der Temperatur (Vostok).

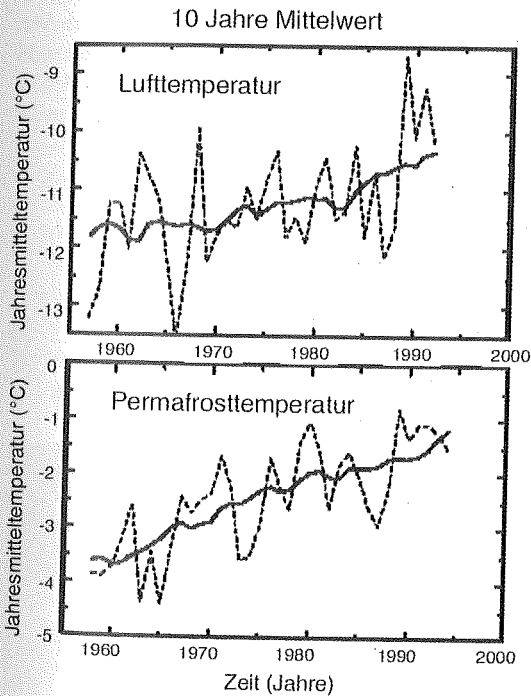


Abb. 1.6-5: Mittlere Luft- und Permafrosttemperatur in 1,6 m Tiefe (gestrichelt) und ihr gleitendes 10 Jahres-Mittel (schwarze Linie) an der meteorologischen Station Churapcha, Ostsibirien (aus ROMANOVSKY 2001).

den Umweltreaktionen auf die klimatischen Verhältnisse zu schließen, und zum anderen die Reaktionen der Arktis auf globale Klimavariationen zu beobachten. Daraus lassen sich Schlussfolgerungen für die zukünftig zu erwartenden Veränderungen ziehen, wenn z.B. die heute beobachteten Trends der globalen Erwärmung anhalten.

Klimabedingte Veränderungen des Permafrosts

Geländebeobachtungen und Modellrechnungen zeigen, dass die über Jahrhunderttausende entstandenen Permafrostabfolgen Sibiriens auch während vergangener Warmzeiten nie vollständig auftauten, selbst wenn, wie z.B. in der Eem-Warmzeit vor ca. 120.000 Jahren, die Temperaturen vermutlich höher waren als heute. Viele Bereiche der heutigen Permafrostmassive sind deshalb Relikte aus den Kaltzeiten des Spätpleistozäns. Abb. 1.6-4 zeigt die Modellergebnisse gesteuerter Variationen der Permafrostmächtigkeit während der letzten 400.000 Jahre für die Küstenregion der Laptewsee. Daraus ergibt sich, dass nicht nur in den heutigen Landgebieten, sondern auch unter dem jetzt gefluteten Schelf, Permafrost die letzten Klimazyklen überdauerte und auch heute noch weite Teile der arktischen Schelfgebiete unterlagert (ROMANOVSKII et al. 2004).

Während der letzten Eiszeit vor ca. 15.000–40.000 Jahren lagen die arktischen Schelfgebiete der Laptew-

Ostsibirischen, und Tschuktschen-See trocken und bildeten damit Festland, da riesige Wassermassen in den großen Gletschern Nordamerikas und Eurasiens gebunden waren. Somit stand in der Arktis ein wesentlich größerer Lebensraum für eine Tier- und Pflanzenwelt zur Verfügung, die es in dieser Ausprägung heute nicht mehr gibt (s. Kap. 3.2). Dieses hunderte Kilometer weiter nach Norden reichende Festland Beringias war ebenfalls von Permafrost geprägt. Es ist anzunehmen, dass sich eine mehrere zehner Meter mächtige Schicht von eisreichen Permafrostablagerungen auf dieser Schelfebene bildete. Mit der globalen Erwärmung am Ende der Eiszeit wurden diese Gebiete der Arktis überflutet und der Permafrostboden taute zum Teil auf (s. Kap. 4.9). Dieser kolossale natürliche Umweltumbruch vollzog sich vor ca. 10.000–2000 Jahren.

In den zirkumarktischen Permafrostgebieten werden schon seit einigen Jahrzehnten Untersuchungen zu Klima bedingten Veränderungen des Permafrosts durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass der beobachtete Anstieg der Lufttemperatur auch eine Erhöhung der Bodentemperatur zur Folge hat (Abb. 1.6-5). Langjährige Messungen der Lufttemperatur an über 20 Stationen in Russland ergaben einen Erwärmungstrend während der letzten 30 Jahre von 0,02–0,3° C/Jahre für den europäischen Norden Russlands, 0,03–0,07° C/Jahr für den Norden Westsibiriens und 0,01–0,08° C/Jahr für Jakutien (PAVLOV 1994). Diese spiegelten sich in einer Temperaturerhöhung von 2–2,5° C und 1° C im Permafrost in Tiefen von 3

bzw. 10 m wider. Eine ähnlich starke Temperaturerhöhung von 2–4° C konnte auch in Bohrungen entlang der Alaska-Pipeline für die letzten Jahrzehnte nachgewiesen werden. Einzelne, isolierte Vorkommen von Permafrost im Süden Alaskas sind daher in jüngster Vergangenheit vollkommen aufgetaut (LACHENBRUCH & MARSHALL 1986). Neben der Erhöhung der Permafrosttemperatur und dem Abtauen in verschiedenen Regionen zeigen Untersuchungen des CALM-Projektes (Circum Arctic Active Layer Monitoring) auch eine Tendenz zu einer Erhöhung der saisonalen Auftautiefe (NELSON et al. 2001).

Prognosen für die Zukunft

Für den Fall einer Klimaerwärmung von 2° C in der Arktis bis zum Ende dieses Jahrhunderts werden sich Veränderungen im Permafrost vollziehen, die mit denen im holozänen Klimaoptimum, der wärmsten und niederschlagreichsten Periode der letzten 10.000 Jahre, verglichen werden können (s. Kap. 4.9). In Analogie zu dieser Zeit kann eine grundlegende Veränderung der natürlichen und technogenen Landschaften postuliert werden. Die raschesten Reaktionen auf wechselnde Klimabedingungen werden an den Grenzschichten Permafrost – Atmosphäre ablaufen, wobei es bei einer Erwärmung vor allem zu einer Erhöhung der sommerlichen Auftautiefe kommen wird. Dies hat unter anderem einen starken Einfluss auf das Verhalten des organischen Kohlenstoffs, der in großen Mengen in arktischen und subarktischen Böden gebunden ist (s. Kap. 4.13). Im Sommer wird dieser Kohlenstoff in der

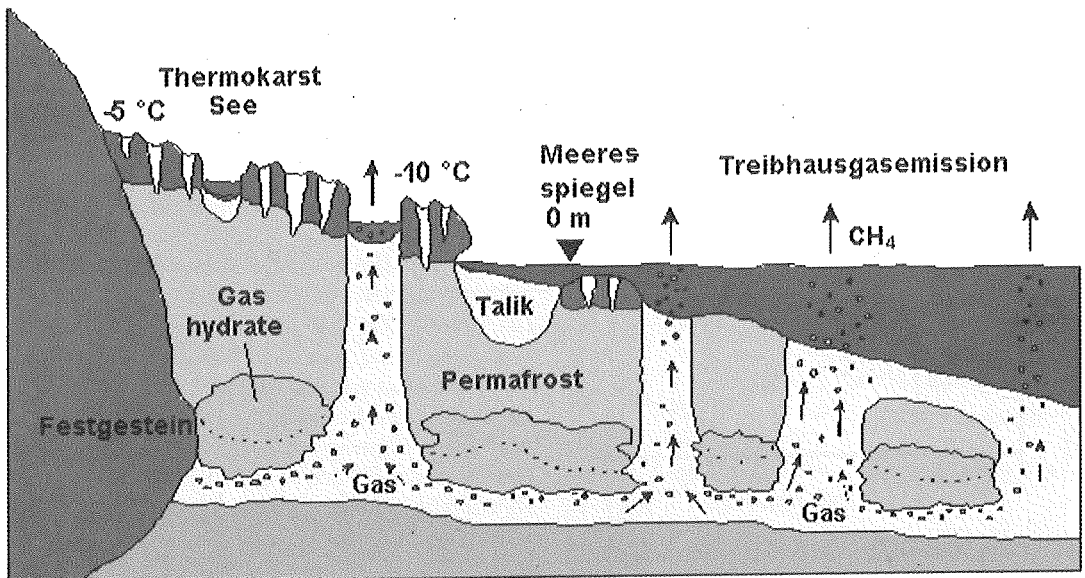


Abb. 1.6-6: Freisetzung des Treibhausgases Methan durch den Abbau von Permafrost (nach ROMANOVSKII 1998).

Auftauzone mikrobiell zersetzt und in Methan und Kohlenstoff umgewandelt (s. Kap. 4.13). Eine Erhöhung der Bodentemperatur und Auftautiefe wird mit einer verstärkten Methanfreisetzung aus Tundraböden einhergehen (Abb. 1.6-6), wobei genauere Bilanzen heute noch nicht gerechnet werden können. Wichtig ist dabei noch zu wissen, dass Methan effektiver den Treibhauseffekt verstärkt als CO_2 (die Wirkung ist je Masseneinheit 23 mal die von CO_2 .)

Bei ausreichend langen Klimaänderungen wird parallel zu einer signifikanten Vergrößerung der Auftautiefe oder der vollständigen Degradation von Permafrostmassiven eine grundlegende Veränderung von Vegetation und Bodenbildung einsetzen. Die entstehenden Ökosysteme werden sich wesentlich von den heute existierenden unterscheiden. Je nach Eisgehalt des Untergrundes wird es zu unterschiedlich starker Thermokarstbildung kommen, bei der durch das Ausschmelzen des Grundeises Senken entstehen, die zu einer Seenbildung und Vertorfung führen. Ein Tauen des Grundeises und eine Erhöhung der Auftautiefe der oberflächennahen Schicht führen zu einer Intensivierung von Solifluktion und anderen Relief bildenden Prozessen. Sie können in dramatischen großräumigen Hangrutschungen münden. In den arktischen Küstengebieten hat eine Degradation des Permafrosts weit reichende Auswirkungen, die sich in einer Zunahme der Küstenerosion und erhöhtem Materialeintrag in das Nordpolarmeer äußern (s. Kap. 4.9). Dadurch werden auch zahlreiche Infrastrukturanlagen wie Häfen, Förderanlagen und Pipelines für Erdöl und Erdgas in Alaska, Nordkanada und Sibirien stark gefährdet. Nach Modellprognosen gehören weite Teile der arktischen Küste zu den Hochrisikogebieten (NELSON et al. 2001).

In den Schelf- und Tieflandsgebieten Eurasiens und Nordamerikas treten im Permafrost selbst oder im Untergrund hohe Methankonzentrationen in Form von Gashydraten auf, deren Erschließung als Energiequelle der

Zukunft ein zunehmendes Interesse gilt. Vor allem in der Region der Beaufort-See und des Mackenzie-Deltas, aber auch in der Kara-See wurden in den letzten Jahren Explorationsbohrungen abgeteuft. Es ist zu erwarten, dass die beobachtete Klimaerwärmung zu einer Destabilisierung der im Untergrund auftretenden Gashydrate führen wird, die zu einem derzeit nicht abschätzbaren zusätzlichen Methan-Eintrag in die Atmosphäre führen kann (Abb. 1.6-6). In der Region der Laptewsee wurden in jüngster Zeit schon große Mengen Methan beobachtet, das von dem tauenden submarinen Permafrost in die Wassersäule gelangte (SHAKOVA et al. 2005).

Schlussbemerkung

Die Permafrostdynamik ist stark mit der globalen Klimaentwicklung verbunden mit zahlreichen Wechselwirkungen und Effekten. Die Kombination der Ergebnisse von Paläoumweltforschung, Beobachtung und Messung der heutigen Prozesse und Simulation der zukünftigen Entwicklung ist eine der wichtigsten Aufgaben für die Permafrostforschung. Noch sind die zeitlichen und räumlichen Skalen sehr verschieden, noch sind nicht alle physikalisch-chemischen Wechselbeziehungen verstanden, noch fehlen darüber hinaus exakte Bilanzen, um den globalen Einfluss der Permafrostveränderungen abschätzen zu können. Es ist jedoch gesichert, dass ein Auftauen des Permafrosts dramatische Änderungen des Ökosystems, der Landschaft und der Infrastruktur der jeweiligen Region bewirken wird. Zudem könnten die in den ausgedehnten Permafrostgebieten Sibiriens und Nordamerikas eingefrorenen großen Mengen an Kohlenstoff, anderen Treibhausgasen und Süßwasser freigesetzt werden und somit z.B. die globalen hydrologischen und Kohlenstoffkreisläufe beeinflussen. Die klimatischen Folgen von Veränderungen z.B. der sibirischen Permafrostgebiete für die gesamte Nordhemisphäre sind heute kaum abzuschätzen ♦